

ИМПУЛЬСНЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРОБОЙ И РАЗРУШЕНИЕ НЕПРОВОДЯЩИХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ДАВЛЕНИЯХ

И. И. КАЛЯЦКИЙ, В. В. КРИВКО

(Представлена научным семинаром кафедры техники высоких напряжений)

Технологический процесс отдельных отраслей промышленности связан с разрушением весьма крепких непроводящих материалов, в том числе горных пород.

В последние годы интенсивно ведутся поиски новых, эффективных способов разрушения твердых тел. При этом среди разрабатываемых способов разрушения особое место занимают способы с использованием электрической энергии. Поэтому исследование электрических характеристик различных твердых материалов представляет научный и практический интерес.

Горные породы, залегающие на больших глубинах, подвержены воздействию высоких давлений и температур, которые могут оказать влияние на электрические характеристики горных пород и эффективность их разрушения при электрическом пробое.

В опубликованной отечественной и зарубежной литературе данные по импульсному пробивному напряжению горных пород при повышенных давлениях отсутствуют.

Настоящая работа посвящена исследованию влияния давления на импульсное пробивное напряжение и разрушение некоторых горных пород и твердых диэлектриков.

Методика эксперимента

Исследование влияния давления (до 150 кг/см^2) на импульсное пробивное напряжение твердых непроводящих материалов проводилось на горных породах: кварците, фельзит-порфире, мраморе и на природной кристаллической каменной соли.

Образцы горных пород и каменной соли имели прямоугольную форму размерами $40 \times 40 \times 20 \text{ мм}$ с коническими выемками и нанесенный металлический электродный слой. Измерение толщины образца в месте пробоя производилось с помощью прибора ИЗВ-1 с точностью до $0,01 \text{ мм}$. В работе использовалась система электродов «стержень-плоскость».

Пробой образцов проводился в специальной камере высокого давления. Камера представляла собой стальной цилиндр диаметром 120 мм и высотой 700 мм с герметически закрывающимися фланцами. Ввод импульсного напряжения до 300 кВ в камеру осуществлялся по отрезку кабеля типа РК-162 со снятой металлической оплеткой. Рабо-

чей средой в камере служило трансформаторное масло с электрической прочностью 30 кВ в стандартном пробойнике. Давление в камере создавалось с помощью гидравлического пресса поршневого типа и измерялось манометром с точностью до $0,5 \text{ кг/см}^2$.

В качестве источника однократных апериодических импульсов высокого напряжения в работе использовался семиступенчатый генератор импульсных напряжений, собранный по схеме Аркадьева-Маркса. Максимальное напряжение генератора 400 кВ, разрядная емкость $0,0135 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$, энергия импульса около 1000 дж. Генератор позволял получать импульсы высокого напряжения с минимальной длиной фронта $0,3 \cdot 10^{-6} \text{ сек}$. Увеличение длины фронта импульса осуществлялось включением индуктивности и емкости.

Пробой твердых материалов при повышенных давлениях проводился на фронте импульса. Импульсы высокого напряжения подавались на стержневой электрод, плоский электрод заземлялся. Амплитуда и длительность импульса регистрировались осциллографом ОК-19М, включенным через омический делитель напряжения сопротивлением 3000 ом.

Каждая экспериментальная точка соответствует среднему арифметическому значению из пробивных напряжений, полученных на основе отработки 20 и более осциллограмм.

Исследование влияния повышенного гидростатического давления на эффективность разрушения твердых тел при импульсном электрическом пробое проводилось на каменной соли. В этом случае образцы имели прямоугольную форму размерами $40 \times 40 \times 10 \text{ мм}$ без конической выемки.

Эффективность разрушения образцов каменной соли при импульсном электрическом пробое оценивалась по величине зоны трещинообразования в образце. Определение зоны трещинообразования проводилось с помощью фотометра Пульриха и непосредственным измерением.

Результаты эксперимента

На рис. 1 представлена зависимость импульсного пробивного напряжения кварцита, фельзит-порфира и мрамора от давления. Импульсы положительной полярности, длительностью $0,5 \cdot 10^{-6} \text{ сек}$. На рис. 1 также приведена зависимость пробивного напряжения трансформаторного масла от давления для тех же условий опыта.

Как видно из рис. 1, пробивные напряжения кварцита и фельзит-порфира с увеличением давления от атмосферного до 50 кг/см^2 возрастают соответственно на 12 и 21% (кривая 2 и 4). Дальнейшее увеличение давления от 50 до 150 кг/см^2 влияния на пробивное напряжение этих пород не оказывает. С ростом давления от атмосферного до 50 кг/см^2 пробивное напряжение мрамора увеличивается от 80 до 115 кВ, т. е. на 43% (рис. 1, кривая 3), и, начиная с давления 50 кг/см^2 , оно оказывается выше про-

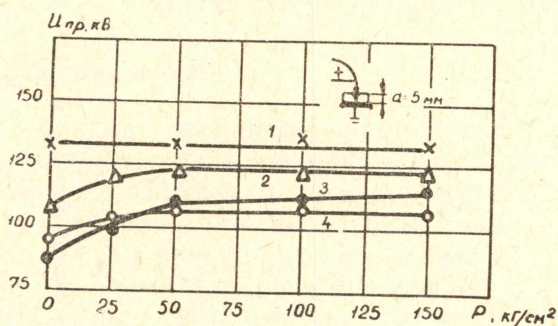


Рис. 1. Зависимость пробивного напряжения трансформаторного масла (1) и горных пород от давления (импульсы положительной полярности длительностью $0,5 \cdot 10^{-6} \text{ сек}$)
2 — кварцит, 3 — мрамор, 4 — фельзит-порфир.

бивного напряжения фельзит-порфира. Наибольшее увеличение пробивного напряжения мрамора (29%) имеет место с изменением давления от атмосферного до 50 кг/см^2 так же, как для кварцита и фельзит-порфира.

Повышение импульсного напряжения исследованных горных пород с ростом давления, по-видимому, связано с двумя факторами:

- 1) с некоторым упрочнением газовых пор породы под давлением;
- 2) с интенсивным проникновением в поры породы трансформаторного масла, пробивное напряжение которого при длительности импульсов $0,5 \cdot 10^{-6} \text{ сек}$ выше пробивных напряжений кварцита, фельзит-порфира и мрамора и от давления не зависит (рис. 1, кривая 1).

Сжимаемость горных пород в интервале давлений до 150 кг/см^2 составляет несколько процентов [1—3] и не может оказать влияния на формирование разряда и величину пробивного напряжения. С увеличением гидростатического давления скорость проникновения рабочей (изолирующей) жидкости в поры породы возрастает. Возрастает и объем образца, пропитанный жидкостью за время пребывания образца в камере в период эксперимента по пробоем. Например, при давлении 50 кг/см^2 за время 2 мин. образец из кварцита размерами $40 \times 40 \times 20 \text{ мм}$ пропитывается на глубину 3 мм, а при давлении 150 кг/см^2 — на 8 мм. Следует отметить, что соотношения процентных повышений пробивных напряжений кварцита, фельзит-порфира и мрамора с изменением давления от атмосферного до 150 кг/см^2 , равные 12, 21 и 43%, примерно пропорциональны соотношению величин их пористости, которые соответственно равны 2,7; 3,0 и 5,4%. Таким образом, наибольшее увеличение пробивного напряжения с ростом давления оказывается у породы с наибольшей пористостью (в данном случае у мрамора).

Возможное влияние пропитки горных пород трансформаторным маслом под давлением на величину их пробивных напряжений подтверждается результатами дополнительных экспериментов.

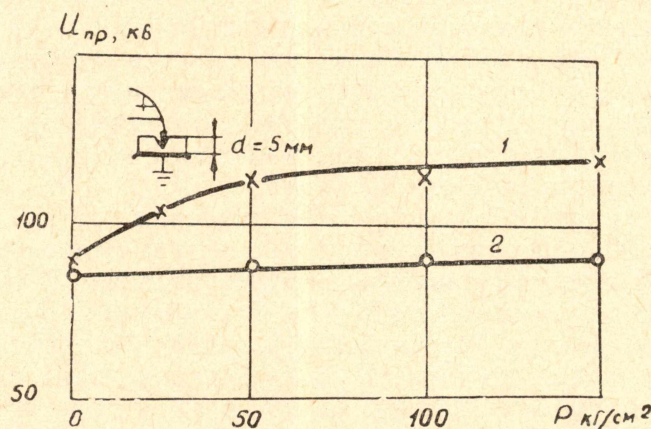


Рис. 2. Зависимость пробивного напряжения мрамора от давления на импульсах положительной полярности длительностью $0,5 \cdot 10^{-6} \text{ сек}$.
1 — образцы без лакового покрытия, 2 — образцы покрыты бакелитовым лаком.

На рис. 2 представлена зависимость импульсного пробивного напряжения мрамора от гидростатического давления. Импульсы положительной полярности длительностью $0,5 \cdot 10^{-6} \text{ сек}$. Одна партия образцов мрамора была изготовлена, как указывалось выше. Поверхность образцов другой партии покрывалась пленкой бакелитового лака. Толщина лакового покрытия составляла 0,01 мм. Лаковая пленка исключала

пропитку образцов мрамора трансформаторным маслом в процессе их пробоя в камере под давлением. Из рис. 2 видно, что для образцов без лаковой пленки (кривая 1) пробивное напряжение с увеличением давления от атмосферного до 150 кг/см^2 возрастает примерно на 40% (так же, как и в первых экспериментах). Для образцов, защищенных пленкой (кривая 2), пробивное напряжение с изменением давления в указанном интервале остается постоянным.

Импульсный электрический пробой твердых тел сопровождается мощным кратковременным выделением энергии в узком проводящем канале. При достаточной энергии и мощности в канале импульсного разряда в твердом теле возникающие ударные волны высокого давления приводят к механическому разрушению тела, обусловленному разрывом его сплошности и трещинообразованием. Изменяя параметры разрядной цепи, а также параметры импульса, можно регулировать количество и скорость выделения энергии в канале разряда, а следовательно, и эффективность разрушения твердых непроводящих и полупроводящих тел при их импульсном электрическом пробое.

На рис. 3 представлена зависимость диаметра зоны трещинообразования в образцах каменной соли при импульсном пробое от гидростатического давления. Импульсы положительной полярности длительностью $0,5 \cdot 10^{-6} \text{ сек}$ и амплитудой 120, 170, 210 и 254 кВ. Разрядная емкость генератора 13500 пФ.

В связи с тем, что при атмосферном давлении используемые образцы каменной соли при пробое на импульсах с минимальной амплитудой (120 кВ) полностью разрушались на 3—4 части и более, за начальное давление принималось давление 25 кг/см^2 .

Как видно из рис. 3, с увеличением давления от 25 до 150 кг/см^2 диаметр зоны трещинообразования уменьшается. Относительное уменьшение диаметра с ростом давления в этом интервале составляет около 30% и для амплитуд импульса 120—154 кВ, примерно одинаково.

Разрушение твердых диэлектриков и других непроводящих тел при их импульсном пробое, по нашему мнению, происходит за счет напряжений сжатия на фронте ударной волны, а также растягивающих усилий, обусловленных отражением упругих волн от свободных поверхностей образцов.

В условиях повышенных давлений пробиваемый образец подвергается деформации сжатия, обусловленной внешним давлением. Следовательно, в этом случае для разрушения образца при импульсном пробое необходимо затратить энергию: во-первых, для преодоления сжимающих усилий и, во-вторых, для преодоления межмолекулярных сил сцепления образца, т. е.

$$P_k = P_p + P_{вн}, \quad (1)$$

где P_k — давление в канале разряда;

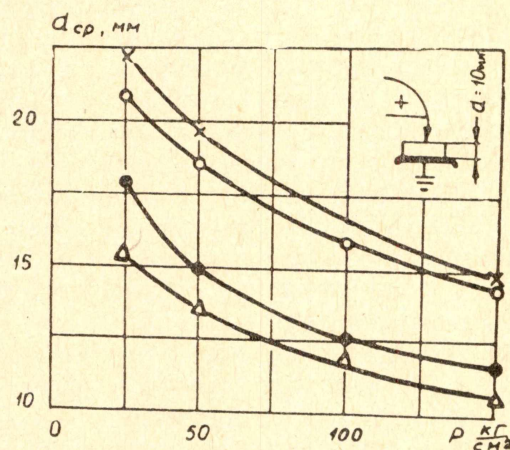


Рис. 3. Зависимость диаметра зоны трещинообразования в каменной соли при сквозном импульсном пробое на импульсах положительной полярности длительностью $0,6 \cdot 10^{-6} \text{ сек}$ различной амплитуды.
1 — 254 кВ, 2 — 210 кВ, 3 — 170 кВ, 4 — 120 кВ.

$P_{вн}$ — внешнее (гидростатическое) давление;

P_p — давление, необходимое для разрушения образца.

Давление в канале разряда (P_k) определяется величиной энергии канала разряда и скоростью ее выделения.

Давление, необходимое для механического разрушения образца при пробое (P_p), зависит от механической прочности материала образца и его линейных размеров. Внешне гидростатическое давление определяет величину деформации сжатия образца. С увеличением гидростатического давления при постоянной энергии импульса, а также неизменной плотности энергии и мощности в канале разряда, механической прочности образца данного материала и его линейных размеров часть энергии, затрачиваемая на преодоление сжимающих усилий, возрастает, следовательно, эффект разрушения будет уменьшаться.

Изменение диаметра зоны трещинообразования в образцах каменной соли при пробое в условиях повышенных давлений до 150 кг/см^2 описывается уравнением

$$d_T = d_{T0} e^{-\alpha P}, \quad (2)$$

где d_{T0} — диаметр зоны трещинообразования при атмосферном давлении,

P — гидростатическое давление,

$\alpha = 0,004$ — коэффициент, характеризующий относительное снижение диаметра зоны трещинообразования с ростом давления.

С увеличением энергии импульсов за счет изменения амплитуды импульса или разрядной емкости диаметр зоны трещинообразования возрастает. Например с увеличением амплитуды импульса от 120 до 170 кв диа-

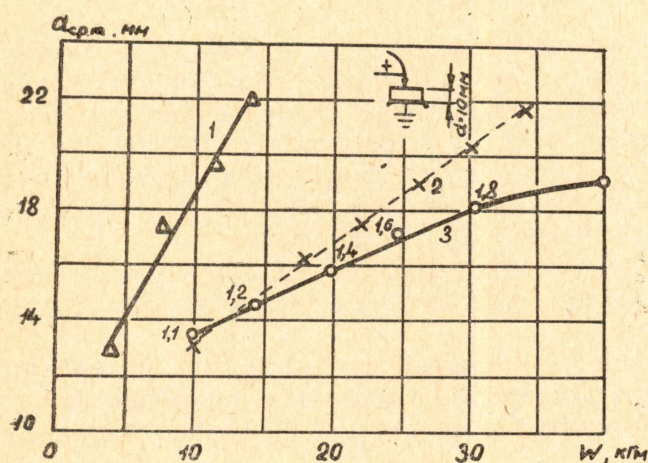


Рис. 4. Зависимость диаметра зоны трещинообразования в каменной соли от энергии импульса при сквозном пробое (длительность импульса $0,6 \cdot 10^{-6}$ сек).

1 — изменение энергии разрядной емкостью, 2 — изменение энергии амплитудой напряжения (расчетная кривая), 3 — изменение энергии амплитудой напряжения (экспериментальная кривая).

метр зоны трещинообразования при давлении 25 кг/см^2 возрастает от 15 до 17,5 мм.

На рис. 4 приведена зависимость диаметра зоны трещинообразования в каменной соли при пробое под давлением 50 кг/см^2 от энергии импульса. Энергия импульса изменялась увеличением разрядной емкости (кривая 1) и амплитуды (кривая 3). Цифры у кривой 3 указывают на величину перенапряжения

$$n = \frac{U_{под}}{U_{пр}}, \quad (3)$$

где $U_{под}$ — напряжение, подаваемое на образец;

$U_{пр}$ — пробивное напряжение.

Как следует из рис. 4, энергетически наиболее рационально увеличение эффективности разрушения твердых тел при их импульсном пробое производить изменением разрядной емкости, а не амплитуды импульса. Начиная с перенапряжения $n = 1,7$, кривая изменения диаметра зоны трещинообразования с энергией импульса как бы перехо-

дит в зону насыщения и дальнейшее увеличение амплитуды импульса становится малоэффективным. Отмеченное обстоятельство объясняется следующим образом. С увеличением перенапряжения на пробиваемом образце доля энергии, выделяющаяся в канале разряда за первый полупериод колебания тока после пробоя, уменьшается. Так как разрушение твердых тел при их импульсном электрическом пробое происходит в основном за время первого полупериода колебания тока после пробоя, то, несмотря на увеличение энергии импульса с ростом амплитуды относительное возрастание диаметра зоны трещинообразования уменьшается. Если бы указанное влияние не имело места, то возрастание диаметра зоны трещинообразования с увеличением амплитуды импульса носило бы прямолинейный характер. Прямая 2 на рис. 4 — расчетная зависимость диаметра зоны трещинообразования с изменением энергии импульса.

Выводы

1. Установлено, что импульсная электрическая прочность горных пород с увеличением давления от атмосферного до 150 кг/см^2 возрастает незначительно. Наибольшее увеличение импульсной прочности имеет место при давлениях до 50 кг/см^2 и составляет 20—40%. С изменением давления от 50 до 150 кг/см^2 импульсная электрическая прочность остается практически неизменной и при времени воздействия напряжения $0.5 \cdot 10^{-6} \text{ сек}$ составляет 220 : 250 кв/см .

2. Эффективность разрушения твердых материалов при их импульсном электрическом пробое с увеличением давления от 25 до 150 кг/см^2 снижается на 30%.

3. Повышение эффективности разрушения твердых материалов при их импульсном электрическом пробое в условиях повышенных давлений целесообразно осуществлять за счет увеличения разрядной емкости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Zisman W. A., Proc. Nat. Acad. Sein. 19, 66, 1933.
 2. Zisman W. A., Proc. Nat. Acad. Sein. 19, 680, 1933.
 3. Zisman W. A., Gerland Beitz, Z. Geophys. 39, 408, 1933.
 4. И. И. Каляцкий, А. Г. Синебрюхов. Изв. вузов СССР, Энергетика, 3, 1963.
-